

Title of the Invention:

光周波数変換装置
(OPTICAL FREQUENCY CONVERTER)

BACKGROUND OF THE INVENTION

Field of the Invention:

【0001】 この発明は、光通信における交換機となる光クロスコネクタなどの波長可変光源で、特に高速で切り換えても光波長が短時間で安定になる波長可変光源として用いることのできる光周波数変換装置に関する。

Description of the Prior Art:

【0002】 光通信分野で、入力された光信号をいくつかの伝送線路に振り分ける方法には、次のものがある事が知られている。1) 一旦電気信号にした後、それぞれの伝送線路に対応した光信号としてにして再び送信する方法。2) 光信号のまま振り分ける方法で、信号の属する光の波長の違いに従って、それぞれの伝送線路に送出する方法。また、一般に、一旦電気信号にする方法よりも、光信号のまま振り分ける方法の方が、情報伝送量が多いことも知られている。

【0003】 この様に、光信号のままそれぞれの伝送線路に振り分けることは、光の波長の違いを用いて振り分けが行なわれることが多い。この方法は、例えば、文献(青山、他、「フोटニックネットワークの展望と今後の技術課題」、O plus E, vol.22, No.11, 2000年 11月、1456-1470)に記載されている。また、例えば、複数の導波路から入力された光信号の波長が同一であり、これらの信号を単数の導波路にまとめる場合は、入力された光信号ごとに光搬送波の波長を変えることにより、単数の導波路での伝送が可能となる。このような方法は既によく知られており、例えば、上記の文献に記載されている。

【0004】 前記のように光信号のままそれぞれの伝送線路に振り分ける場合

20060925 10090957-031902

には、波長可変光源が使われるが、これには、高速動作ができ、且、特性の安定した波長可変光源が望ましいことは、容易に理解できる。

【0005】 このような用途に従来用いられてきた光源には、分布反射型（D B R）レーザ、あるいは、分布帰還型（D F B）レーザ等があったが、波長を変えた場合に出力波長が安定するまでに要する時間は、数十ミリ秒程度必要であり、40 Gビット／秒の光通信で、パケット長4000ビットのパケット伝送を行なう場合には、上記の波長切り換えに要する時間が、1パケット長の伝送時間（100 n s）を上回り、高速通信の障害となっていた。

【0006】 本発明は、前記のような用途に用いることのできるもので、光周波数を高周波信号により変換する波長可変光源に関する。従って以下では、このような光源の従来例について説明する。

【0007】 入力された光の周波数を変換するための装置としては、次に述べる様にいくつかの方法が知られている。例えば、（1）非線型光学結晶に2種類の光を入力して、それらの光を混合する方法がある。これは既に良く知られており、レーザ光自体の周波数を2倍にする場合にも使われている。また、（2）モードロックレーザを用いる方法がある。これは、レーザ共振器中に光変調器とアイソレータとファブリーペローエタロンとを設置して光パルスが発生する方法である。これは、位相変調周波数 f_m より K_m 倍高次の周波数 f_p （ $f_p = K_m * f_m$ ）の側帯波を発生する方法としても知られている。あるいはまた、（3）光を高周波信号で変調して、その側帯波を取り出すことにより、光の周波数を変換する方法である。この方法も既に知られている。

【0008】 これらの方法を用いて、周波数の異なる光に切り換えるには、次の様にする。上記の（1）の場合には、少なくとも一方の光を、周波数の異なる光に切り換える。また、（2）の場合には、発生した側帯波を選択する濾波器をさらに設けて、周波数の異なる光に切り換える。また、（3）の場合には、高周波信号の周波数を切り換える。このような方法で、周波数の異なる光に切り換えられることは容易に想像できる。

【0009】 本発明は、上記の（3）光を高周波信号で変調して、その側帯波を取り出すことにより、光の周波数を変換する方法、に近いので、この点につい

て以下に説明する。

【0010】 光を高周波信号で変調するには、光変調器に光搬送波と高周波信号を入力して、強度変調や位相変調等を行なうことが一般に行われている。この方法では、与えられた高周波信号以上の周波数を持った側帯波を得る場合、高周波信号を逡倍してさらに高周波の電気信号を作りだし、この信号で光変調を行なっていた。この様に高周波信号を逡倍する場合でも、最大の変調周波数は、電気信号の上限により決められていた。例えば、電気信号の逡倍あるいは増幅等では、電気回路の持った最大特性により周波数の制限があった。このため、これを超える手段が求められていた。

【0011】 与えられた高周波信号以上の周波数を持った側帯波を得る試みとして、これまでに、変調指数を高く取った位相変調の例が報告されている。例えば文献1（小林哲郎、「ドメイン反転外部位相変調器を用いた超短光パルスの発生」、応用物理、第67巻、第9号（1998）、1056-1060頁）には、LiTaO₃の電気光学結晶を導波路として用い、その上にストリップ線路共振器をつけた光変調器に16.26GHzの高周波信号を印加して、変調指数が87ラジアンするとき、そのスペクトル幅が約2.9THzになった旨、報告されている。

【0012】 また、単色光を、非線型特性を持った変調器を用いて高周波信号で変調し、その高次の側帯波を発生させて、その光信号を光検出器で検出することにより、高周波信号を作り出す方法が、文献2（アメリカ合衆国特許 5,040,865号）に記載されている。この公報には、また、第1の変調器により、上記の方法で第1の高周波信号を作り出し、この信号を、第2の変調器に印加して、上記の方法で第2の高周波信号で、変調する方法が開示されている。しかし、この形態では、与えられた高周波信号を逡倍した電気信号を用いるので、電気回路の周波数に関する制限を受けることになる。

【0013】 上記の変調指数を高く取った位相変調の手段では、高い変調指数を得る必要がある。このために、高周波信号の振幅を大きくすることを目的に、ストリップ線路共振器を変調器の電極として用いており、変調周波数を変えることが困難になっている。また、共振器を変調器の電極として用いることを避けると、大振幅の高周波信号が必要になるが、このために高周波信号を増幅すること

も行なわれている。この場合は、変調周波数を変えて光の周波数を容易に変える手段となることは容易に想像されるが、この増幅装置の帯域幅が、変調信号の周波数や得られる光の周波数の上限を決めてしまうことは良く知られている。

【0014】 この発明は上記に鑑み提案されたもので、上記の文献1に記載された変調指数を高く取った位相変調の手段に比べて、振幅の小さい高周波信号でも高次の側帯波を容易に得られる構成を有することにより、振幅の小さい高周波信号でも広い範囲にわたって光周波数を切り換えることのできる光周波数変換装置を提供することを目的としている。

SUMMARY OF THE INVENTION

【0015】 上記目的を達成するために、本発明における第1の要点は、光周波数変換装置に関しており、予め決められた周波数の光を変調信号により変調して、その側帯波群を得る手段と、その側帯波群のなかから側帯波を選択する手段と、前記の変調信号の周波数を変えて、上記の側帯波を選択する手段と、を備えることである。ここで、側帯波群とは、搬送波について対称な位置にある2つの側帯波で、1次から高次の側帯波までを含むものとする。

【0016】 また、本発明における第2の要点は、光周波数変換装置に関して、 n を予め決められた1以上の整数とすると、予め決められた周波数の光を変調信号により変調して、その第 n 次側帯波群を得る手段と、該第 n 次側帯波群を変調して第 $n+1$ 次側帯波群を得る手段と、多数の側帯波群のなかから特定の側帯波を選択する手段と、上記の変調信号の周波数を切り換えて、上記の選択される側帯波を切り換える手段と、を備えることである。ここで、第 n 次の側帯波とは、搬送波から、変調周波数の n 倍の周波数分離れた側帯波を指し、第 n 次の側帯波群とは、搬送波について対称な位置にある2つの側帯波を指すものとする。

【0017】 また、本発明における第3の要点は、多重変調を行なうために、上記の第1あるいは第2の要点に加えて、上記の光周波数変換装置は光路を有し、その光路は、反射手段によって折り返されていることである。

【0018】 また、本発明における第4の要点は、多重変調を行なうために、上記の第1、第2あるいは第3の要点に加えて、上記の光周波数変換装置は変調

手段を有し、その少なくとも1つの変調手段には、次数の異なる側帯波群が入力されることである。

【0019】 また、本発明における第5の要点は、多重変調を行なう光回路を形成するために、上記の第3の要点に加えて、上記の光周波数変換装置は第1の反射手段と第2の反射手段とを有し、変調を受ける前の上記の予め決められた周波数の光を通過させる第1の反射手段と、複数の透過帯域を有する第2の反射手段と、を有することである。

【0020】 また、本発明における第6の要点は、多重変調を行なう光回路を形成するために、上記の第1ないし第5のいずれかの要点に加えて、レーザ光源と狭帯域フィルタ1とからなる第1の反射手段と、光変調器と、狭帯域フィルタ2とからなる第2の反射手段と、を手段要素として含むことである。

【0021】 また、本発明における第7の要点は、出力光の強度を最適化するために、上記の第1ないし第6のいずれかの要点に加えて、上記の光周波数変換装置は光路を有し、その光路長を変更する手段をさらに備えたことである。

【0022】 本発明の形態や特性あるいはその利点については、以下に図面と本発明の詳細を示して明らかにする。

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

【0023】 図1

光周波数変換装置の望ましい実施例を示すブロック図である。

【0024】 図2

光周波数変換装置の望ましい実施例を示すブロック図である。

【0025】 図3

光周波数変換装置の基本原理を示すブロック図である。

【0026】 図4

光周波数変換装置の原理を実証する実験装置のブロック図である。

【0027】 図5

側帯波と変調周波数とファブリペローフィルタの透過スペクトルとの関係を示す図である。

DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENT

【0028】 以下に、この発明の実施例を図面に基づいて詳細に説明する。先ず本発明の原理を、図3を用いて説明する。図3の入力光は単一の周波数 f_0 を持った光であり、狭帯域フィルタ1は、周波数 f_0 の入力光には透過であるが、その周波数から僅かにずれた光は反射する、という特性をもったフィルタである。また、光変調器は、左向きあるいは右向き、どちら向きの光についても変調周波数 f_m の同じ特性で変調することができる光強度変調器である。また、狭帯域フィルタ2は、透過スペクトルの中心については、狭帯域フィルタ1とは異なるものであり、その自由スペクトル幅(FSR=Free Spectral Range)は、狭帯域フィルタ1のそれよりも小さいものである。

【0029】 この時、狭帯域フィルタ1を通して入力された周波数 f_0 の光は、変調されて、図3(b)に示す側帯波が生じるが、簡単のため線形の変調が行なわれるものとし、また、変調によってもとの搬送波は消滅し、第1次側帯波群のみが発生するものとする。この第1次側帯波群は、狭帯域フィルタ2の透過スペクトルに相当しなければ、これによって反射され、再び光強度変調器を通過し、この際、側帯波群が変調を受け、図3(c)に示すスペクトルとなる。これらの光のうち、搬送波に相当する成分は狭帯域フィルタ1を通過してしまうので、図3(d)の様に側帯波のみが反射され、さらに変調を受け図3(e)のスペクトルとなる。この変調により、第1次と3次の側帯波が発生するが、図3(g)に示す第3次の高周波数の側帯波は、その波長が狭帯域フィルタ2の透過スペクトル帯域に相当する場合は、狭帯域フィルタ2を通過する。この様に、狭帯域フィルタ2からは、入力された光が、高周波信号の3倍の周波数分高くなって出力される。ここでさらに、高周波信号の周波数を変えることによって、なんらかの側帯波が狭帯域フィルタ2の透過スペクトルのどれかに合うようにすることができる。また、逆に、透過スペクトルの中心周波数からの位置を指定すれば、高周波信号の周波数と、必要な側帯波の次数をあきらかにすることは容易である。

【0030】 上記の説明においては、光変調器は強度変調器としたが、位相変調器であっても同様の効果が得られることは容易に理解できる。また、本発明の

用途に望ましい変調器としては、進行波型の変調器である。特に進行波型の変調器においては、両端の電極から、変調信号を入力することによって、どちら向きの光についても同じ特性で変調することができる。

【0031】 図4は本発明の原理を実証するための実験の手段を示す図である。ファイバグレーティング(FBG)1とファイバグレーティング(FBG)2での反射により、光変調器に入力光を複数回、通過させ、高次の側帯波を得るものである。レーザ光源は波長1550nm、出力10mWの半導体レーザであり、アイソレータは市販のNewport社製である。また、グレーティングは、市販の3M社製であり、例えば文献3(井上亨、「グレーティング技術の開発動向」、C-3-67、2000年電子情報通信学会総合大会、246-247頁)に記載されている。光変調器は、市販の住友大阪セメント社製の進行波型光位相変調器であり、周波数40GHz以下の高周波信号入力で動作可能である。この手段で周波数30GHz、出力27.8dBmの変調信号を入力したところ、搬送波から210GHz離れた側帯波を-32dBmの出力で得ることができた。

【0032】 図1は、本発明の光周波数変換装置の望ましいひとつの実施例を示す図である。この光周波数変換装置は、予め決められた周波数の光を発生するための単一モードレーザ光源1(発振周波数 $f_{LD}=200.033\text{THz}$)と、戻り光の影響を抑えるためのアイソレータ2と、偏波コントローラ3と、第1の反射手段としてのファブリペローフィルタ4(透過スペクトル $=200.033\text{THz}$ 、FSR $=300\text{GHz}$)と、光を変調信号により変調して、その側帯波群を得る手段としての光位相変調器5と、側帯波群のなかから側帯波を選択する手段であり第2の反射手段としてのファブリペローフィルタ6(透過スペクトル $=200.000\text{THz}$ 、FSR $=50\text{GHz}$)と、分岐器7と、アンプ8と、高周波信号源9とからなっている。高周波信号源9の発振周波数を切り換えて変調周波数を切り換える構成となっており、これは、変調信号の周波数を変えて、上記の側帯波を選択する手段を提供している。

【0033】 このとき、単一モードレーザ光源1からの光は、ファブリペローフィルタ4を透過して、光位相変調器5により、位相変調を受ける。一般に、位相変調により、高次の側帯波が出る。

【0034】 ここで、図5に側帯波と変調周波数とファブリペローフィルタ6の透過スペクトルとの関係を示す。変調周波数が17GHzのとき、1次の側帯波として、200.050GHzの側帯波が発生し、この光は、ファブリペローフィルタ6の透過スペクトルであるので、これを通過することができるが、2次の側帯波である、200.067GHzの光は、ファブリペローフィルタ6を通過することができない。同様に、3次の側帯波である、200.084GHzの光は、ファブリペローフィルタ6を通過することができない。

【0035】 また、変調周波数が33.5GHzのとき、1次の側帯波として、200.0665GHzの側帯波が発生し、この光は、ファブリペローフィルタ6の透過スペクトルでないの、これを通過することができないが、2次の側帯波である、200.100GHzの光は、ファブリペローフィルタ6を通過することができる。また、3次の側帯波である、200.1335GHzの光は、ファブリペローフィルタ6を通過することができない。他のファブリペローフィルタ6を通過することができる。このような光の発生する変調周波数と側帯波の次数との関係を、表1に示す。

表 1

ファブリペローフィルタ6の注目する透過スペクトルの中心スペクトルからの次数 n	注目する透過スペクトルと単一モードレーザ光源の発振周波数との差 (GHz)	側帯波の次数 k	変調周波数 (GHz)
1	17	1	17.0
2	67	2	33.5
3	117	3	39.0
0	33	1	33.0

-1	83	2	41.5
2	133	3	44.3
3	183	4	45.75

【0036】 このように、単一モードレーザ光源1の発振周波数が決まっているとき、変調周波数と側帯波の次数を選択して、ファブリペローフィルタ6の透過スペクトルのどれかに一致させることにより、光の周波数を瞬時に切り換えることができる。ここで、正の整数である n 、 k について、 k を側帯波の次数とし、 n をファブリペローフィルタ6の透過スペクトルの中心スペクトルからの順位とし、 f_{LD} を単一モードレーザ光源1の発振周波数とし、 f_{FP} をファブリペローフィルタ6の中心スペクトルの周波数とし、 f_{FSR} をFSRの周波数表示とし、 f_M を変調周波数とすると、次のような関係に有る。

$$f_{LD} + k \times f_M = f_{FP} + n \times f_{FSR}, \quad \text{あるいは、}$$

$$f_{LD} - k \times f_M = f_{FP} + n \times f_{FSR}, \quad \text{あるいは、}$$

$$f_{LD} + k \times f_M = f_{FP} - n \times f_{FSR}, \quad \text{あるいは、}$$

$$f_{LD} - k \times f_M = f_{FP} - n \times f_{FSR} \quad \text{。}$$

これらの関係に従って、それぞれの値を決めればよい。

【0037】 このようにして求められた値は、コントローラ10に保存され、与えられた n について、必要に応じて参照されて、 k と変調周波数 f_M が決められる。変調周波数 f_M を高速に切り換えることについては、既に10～20ナノ秒で切り換えられる高周波発振装置が既によく知られており、可能であるから、光の周波数を高速に切り換えることが実現できたことになる。

【0038】 本発明の利点の特徴は、上記の様に、切り換えようとする光の周波数範囲をカバーできる高周波信号を用意する必要がなく、その範囲の4分の1程度の高周波信号で目的を達成できる点にある。

【0039】 図2は、本発明のの光周波数変換装置の望ましい他の実施例を示す図である。この光周波数変換装置は、単一モードレーザ光源1と、戻り光の影響を抑えるためのアイソレータ2と、偏波コントローラ3と、ファブリペローフ

フィルタ 4 (透過スペクトル=200.033THz、FSR=300GHz) と、光位相変調器 5 と、光路長を外部から制御できる可変光ディレイライン 11 と、ファブリペローフィルタ 6 (透過スペクトル=200.000THz、FSR=50GHz) と、分岐器 7 と、アンプ 8 と、高周波信号源 9 とからなっている。ここで、可変光ディレイライン 11 としては、既に、プリズムや反射鏡を用いて、自由空間の光路を変えるもの、光ファイバーをヒータで加熱して熱膨張により光路長を変えるものや、圧電素子や磁歪素子を用いて光ファイバーを機械的に伸縮させるもの、等が知られており、これらのどれでも用いる事ができる。

【0040】 この可変光ディレイライン 11 の効果は、ファブリペローフィルタ 4 とファブリペローフィルタ 6 間の光路長を調整して、出力光の強度を最適化する点にある。ファブリペローフィルタ 4 とファブリペローフィルタ 6 間での反射により光変調器に入力光を複数回通過させ高次の側帯波を得る際に、出力光の強度は、反射時の光の位相に依存している。この光の位相は、単一モードレーザ光源 1 から光の周波数と変調周波数と光路長とに依存しているため、光路長を調整して、出力光の強度を最適化するものである。この可変光ディレイライン 11 は、コントローラ 10 により制御されており、光周波数の切り換えに合わせて、切り換えられる構成となっている。したがって、この実施例の場合は、先の実施例の場合の与えられた n について、 k と f_M が切り換えられることに加えて、可変光ディレイライン 11 の条件も切り換えられる。

【0041】 前述の様に、この可変光ディレイライン 11 は、光路長を調整することにより、光の位相を調整して出力光の強度を最適化するものであったが、同様のことは、コントローラ 10 により制御されたバイアス発生器 12 からのバイアス電圧を光位相変調器 5 に印加して位相を調整することによっても行うことができる。この様に、バイアス電圧によって出力光の強度を最適化する事の利点は、その応答時間が短い点にある。また、可変光ディレイライン 11 による調整の利点は、ノイズの多い環境でも用いることができる点にある。このようなことから、この実施例では、切換器 13 を用いて、これらの調整手段を選択する構成としている。

【0042】 ここで、環境温度の変化に対して安定に動作するようにするため

に、狭帯域フィルタ 2 は、その透過スペクトル特性を、外部から、例えば、電圧、電流、温度、磁場、圧力、あるいは電磁波等を介して制御できるものが望ましい。このためには、例えば、文献 4（特開平 1 1 - 9 5 1 8 4 号公報）に記載されている、高分子分散型液晶層をキャビティに用いたファブリーペローエタロン型の波長可変フィルタを用いることができる。

【0043】 上記の変調器の変わりに、文献 5（下津、他 4 名、「集積型 LN 位相変調器による光サブキャリア発生」、C-3-20、2000 年電子情報通信学会総合大会、199 頁）に記載されている側帯波群を残し搬送波を減衰させる変調器を用いてもよい。

【0044】 また、光変調器としては、半導体を用いた吸収型のもの、電気光学効果をもつ材料を用いたマッハツェンダ干渉型強度変調器や、電気光学効果をもつ位相変調器を用いることができる。

【0045】 また、この手段において、光増幅器は、狭帯域フィルタ 1 と、狭帯域フィルタ 2 の間にあれば、その位置に特別の意味は無く、可変光ディレイライン 1 1 と入れ替えても同じ効果を得る事ができる。

【0046】 また、上記のそれぞれの実施例においては、狭帯域フィルタ 1 あるいは狭帯域フィルタ 2 としてファブリーペローフィルタを用いたが、ファブリーペローフィルタに限る理由は無く、例えばファイバブラッググレーティングを用いても狭帯域フィルタを構成することができる。ファイバブラッググレーティングを用いる利点のひとつは、光路をすべての光路をファイバ内に構成することができるので、ファイバ外への光信号に入出力の際に発生する信号強度の損失を防ぐことができる点にある。また、他の利点のひとつは、ファイバブラッググレーティングの構造を変えることによって、透過帯域の周期が等間隔であるファブリーペローフィルタのものとは、異なる周期のフィルタを構成できる点にある。

【0047】 この発明は上記した手段からなるので、以下に説明するような効果を奏することができる。

【0048】 まず、予め決められた周波数の光を変調信号により変調して、その側帯波群を得る手段と、その側帯波群のなかから側帯波を選択する手段と、前記の変調信号の周波数を変えて、予め決められた側帯波を選択する手段と、を備

えることにより、高周波信号の周波数と、側帯波の次数を選択することによって、光信号の周波数を瞬時に切り換えられるようになった。

【0049】 また、度重なる変調を行なうことにより、より小さい変調信号によって、光信号の周波数を瞬時に切り換えられるようになった。

【0050】 また、反射手段により、光路を折りたたんだ構造としたので、光の多重変調を行なうことができた。

【0051】 さらに、ひとつの変調器で度重なる変調を行なえるようにしたので、変調器の数を減らすことができる様になった。

【0052】 さらに、既に良く知られた光学部品である複数の透過帯域を有する第2の反射手段によって、側帯波を選択するようにしたので、容易に光周波数を切り換えることのできる光周波数変換装置を構成できるようになった。

【0053】 さらに、既によく知られた、レーザ光源と、狭帯域フィルタ1とからなる第1の反射手段と、光変調器と、狭帯域フィルタ2とからなる第2の反射手段とを含む構成によって、容易に光周波数を切り換えることのできる光周波数変換装置を実現できる様になった。

【0054】 さらに、第7の発明では、光路長を変更する手段をさらに備えることにより、最適な強度を持った出力光を得る事ができるようになった。